



UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
INGENIERIA

Sistemas Eléctricos de Potencia

Expuesto por:
Saniel Salazar



Contenido

1. Introducción a los Sistemas Eléctricos de Potencia

- 1.1 Los sistemas eléctricos de potencia.
- 1.2 Estructura y Componentes de un SEP.

2. Flujo de Potencia

- 2.1 Modelamiento de los componentes del SEP .
- 2.2 Ecuaciones de flujo de potencia Activa y Reactiva.

3. Introducción a la estabilidad de los SEP

- 3.1 Elementos de estabilidad del SEP.
- 3.2 Regulación Primaria y Secundaria de Frecuencia.
- 3.3 Equipos de compensación.

4. El Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN)

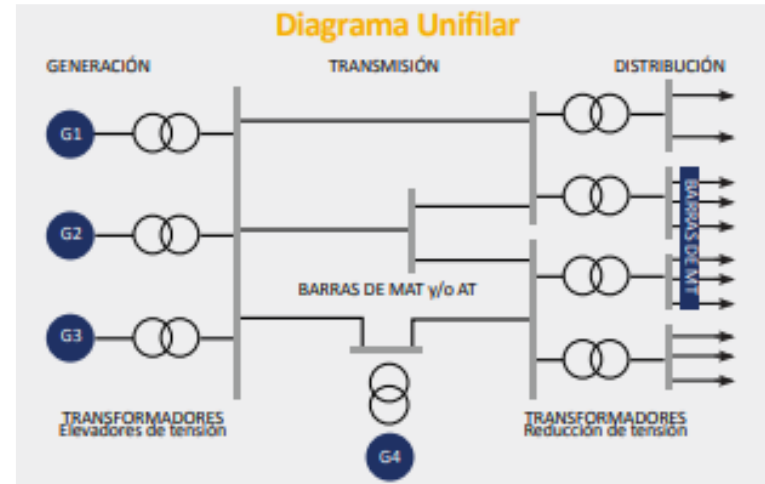
- 4.1 Estructura organizacional del SEIN.
- 4.2 Operación comercial del SEIN.
- 4.3 Situación actual del SEIN.



1. Introducción a los Sistemas Eléctricos de Potencia

1.1 Los Sistemas Eléctricos de Potencia

Un sistema eléctrico de potencia es un conjunto de elementos tales como: generadores, transformadores, líneas de transmisión, compensadores, distribuidores y consumidores, que tiene como fin atender la demanda de energía eléctrica con la mayor calidad, al menor costo posible y cumpliendo las NTCSE.



Es el conjunto de subsistemas eléctricos que tiene como función efectuar procesos enfocándose en la generación, transmisión y distribución de la energía en condiciones para su consumo posterior. Existiendo una variedad enorme de sistemas eléctricos ya que pueden abarcar países, ciudades, industrias, y todo aquello que requiera de energía eléctrica para funcionar.



(S.E Europa Foto: Entsoe)

1.2 Estructura y Componentes del SEP

■ Generación

- Central de Generación
 - Generador + motor primo
- Subestación de generación (potencia)
 - Transformadores elevadores (MT/AT-MAT)

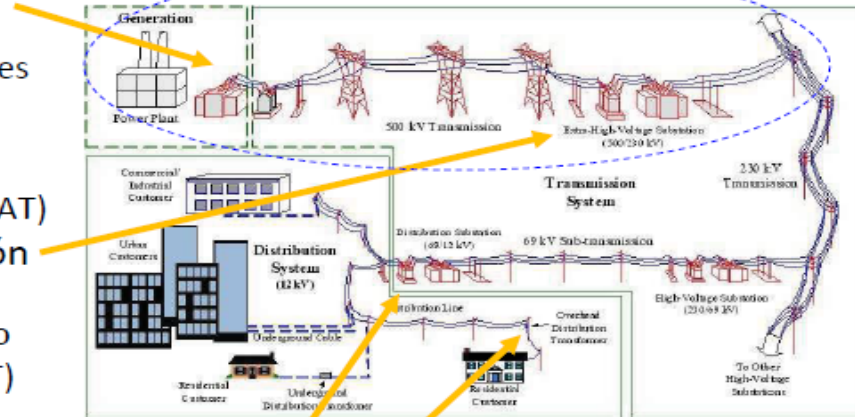
■ Sistema de Transmisión

- Líneas de transmisión (AT-MAT)
- Subestaciones de transmisión (potencia)
 - Equipos de Seccionamiento
 - Transformadores (MAT, AT)

■ Sistema de Distribución

- Subestaciones de subtransmisión (potencia)
 - Transformadores reductores (MAT-AT/MT)
- Alimentadores de distribución (MT)
 - Subestaciones de distribución (MT/BT)

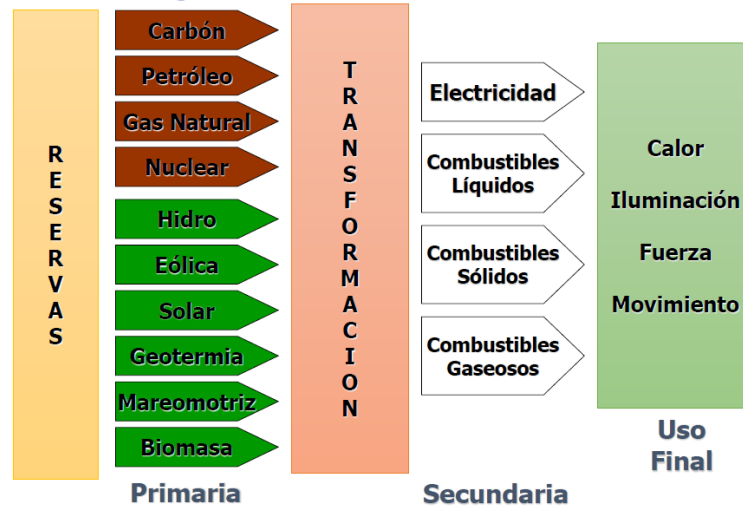
Un sistema de Potencia comprende:
Generación + Transmisión Principal



1.2.1 Generación

Los Generadores eléctricos convierten la energía mecánica en energía eléctrica

Fuentes de Energía:



Centrales Hidráulicas:

De pasada, Ejm. Cañón del Pato, Machupicchu.

De regulación, Ejm. Central de Mantaro, Huinco.

Mixtas, Ejm. Tintaya, Gallito Ciego. Centrales

Térmicas:

Diesel, derivados del petróleo. Ejm. Dolores Pata, Iquitos.

A Vapor, antiguas usan carbón (Ilo), actualmente usan Gas Industrial, Gas Natural (Chilca), Ciclo combinado (Kallpa, Ventanilla).

Centrales con RER:

-Eólicas: Marcona, Cupisnique, Tres hermanas, Wayra.

-Solares: Majes, Repartición, Rubí.

-Biomasa: Huaycoloro, la Gringa.

1.2.2 Sistema de Transmisión

Redes eléctricas de transmisión

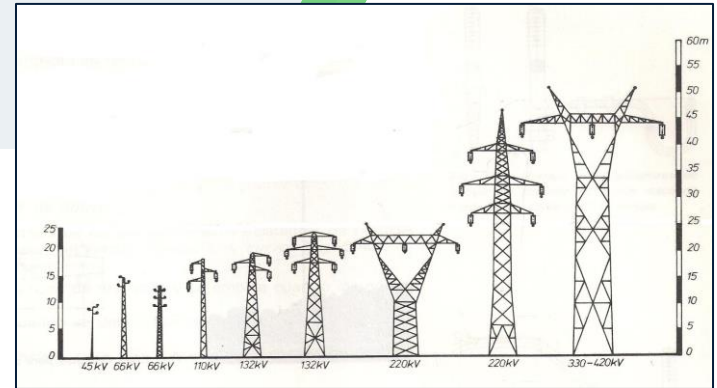
Transportan la energía desde las centrales de generación hasta las subestaciones mediante líneas de transmisión.

Líneas de transmisión

Transportan bloques de energía a donde sea requerido.

Subestaciones

- Subestaciones de Generación.
- Subestaciones de maniobra
- Subestaciones de transformación



➤ Baja Tensión:

380 / 220 V
440 / 220 V



Sistema
Distribución
Secundaria

➤ Media Tensión:

20,0 kV
22,9 kV
33 kV
22,9 / 13,2/13.8 kV
33 / 19 kV



Sistema
Distribución
Primaria

➤ Alta Tensión:

60 kV
138 kV
220 kV



Sistema de
Transmisión

➤ Muy Alta Tensión:

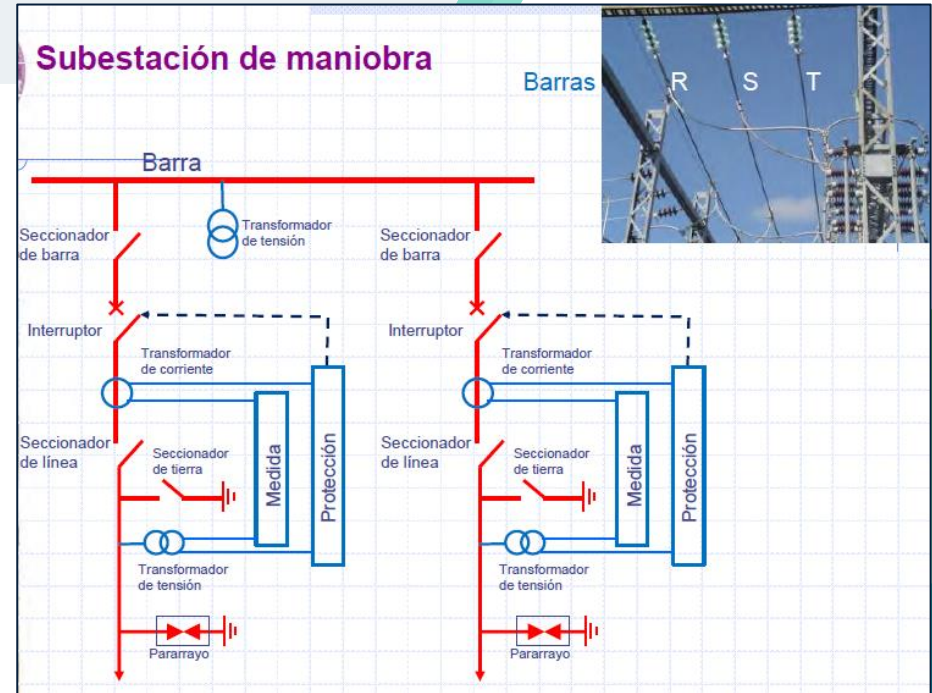
500 kV

1.2.3 Sistema de Distribución

Redes eléctricas de distribución

Canalizan la energía eléctrica desde las subestaciones hasta los consumidores finales mediante

- Subestaciones de distribución
- Redes de distribución primaria
- Redes de distribución secundaria

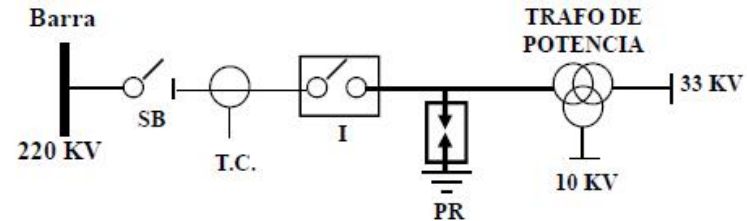


Transformadores de Potencia

El Transformador es el Activo más Importante de un Sistema de Transmisión.

El transformador es una máquina estática la cual mediante inducción electromagnética transforma tensiones y corrientes eléctricas alternas o pulsantes entre dos o más devanados a la misma frecuencia y usualmente a valores diferentes de tensión y corriente.

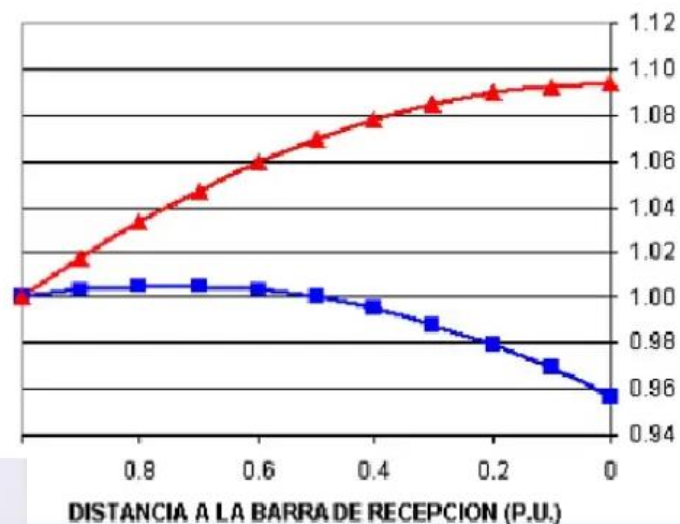
4. CELDA TÍPICA DE UN TRANSFORMADOR O REACTOR DE POTENCIA



1.2.4 Equipos de compensación

Reactores SHUNT

Se utiliza para compensar el efecto capacitivo de las LL.TT largas (mayor a 100km) cuando son energizadas u operan a baja carga, $t=100\text{ms}$.



REACTOR CON NUCLEO DE AIRE DE 50 MVar
SVC TRUJILLO



REACTOR MARCONA 5 MVar, 10 kV



REACTOR DE NUCLEO DE AIRE TRENCH 5 MVar, 138 kV, 60Hz

Capacitores SHUNT

Medio mas económico para producir energía reactiva, pueden estar fijos o maniobrados mecánicamente.

En Distribución: Corrección del factor de potencia y el control de tensión de alimentadores.

En Transmisión: Compensar las perdidas $X^2 \cdot I$ en condiciones de alta carga. Operados mediante interruptores de manera automatica con un relé de tension o manualmente.

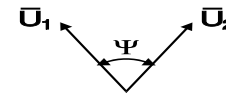
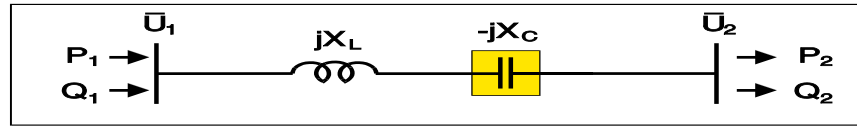


BANCO DE CAPACITORES DE 9.6 MVar, 50 kV

Capacitores Serie

Se utiliza para compensar la impedancia inductiva de líneas largas y mejorar la estabilidad del sistema.

Además se mejora la potencia transmitida entre subestaciones, es un equipo de compensación reactiva que aumenta su potencia reactiva incrementando su capacidad de transmisión.



**Power Transfer WITHOUT
Series Compensation**

$$P_2 = \frac{U_1}{X_L} U_2 \sin \Psi$$

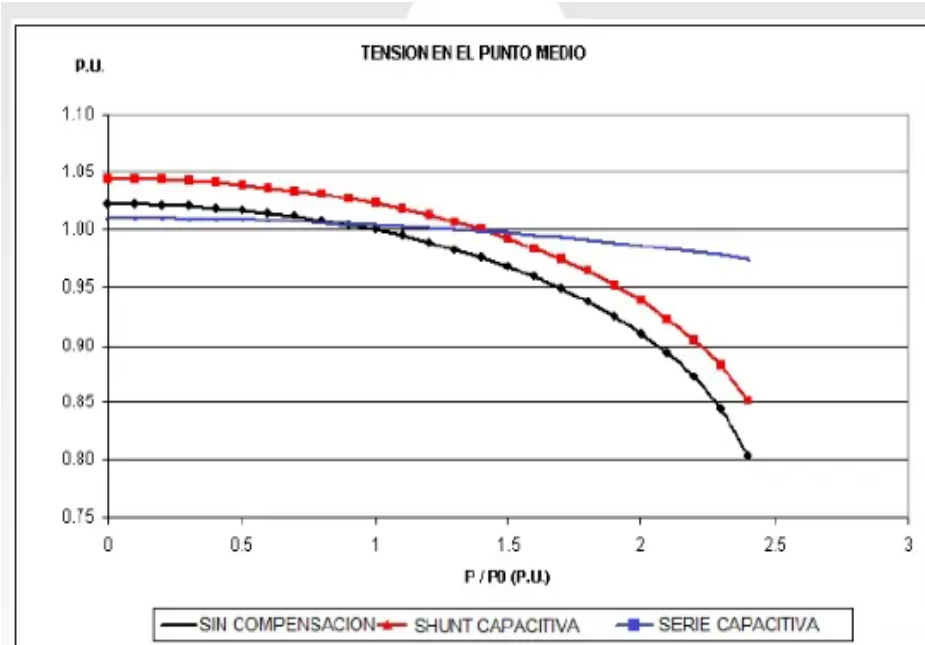
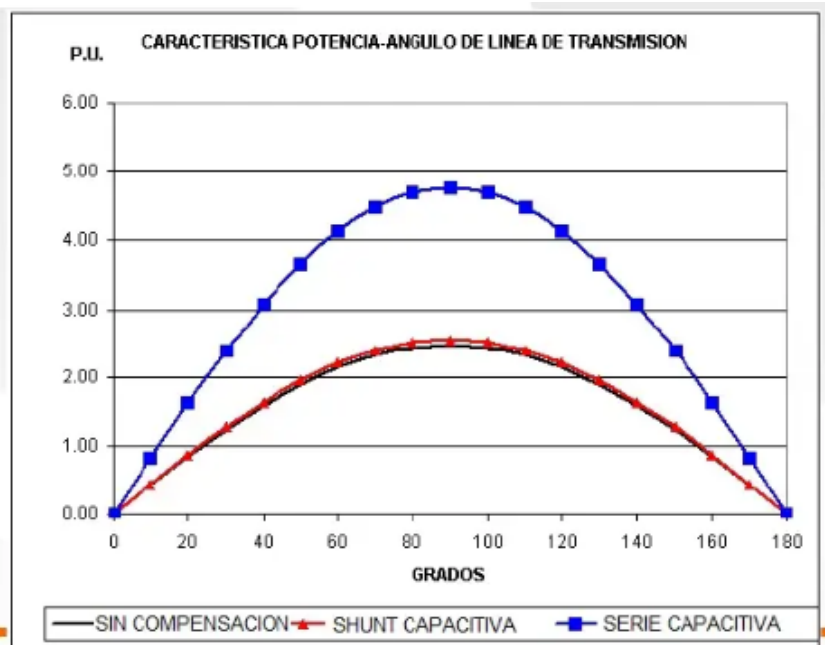
**Power Transfer WITH
Series Compensation**

$$P_2 = \frac{U_1}{X_L - X_C} U_2 \sin \Psi = \frac{U_1}{X_L(1-k)} U_2 \sin \Psi$$

Degree of Compensation: $k = \frac{X_C}{X_L}$

$$P_2 = \frac{U_1}{X_L} \frac{U_2}{X_L} \sin \Psi$$

$$P_2 = \frac{U_1}{X_L - X_C} \frac{U_2}{X_C} \sin \Psi = \frac{U_1}{X_L(1-k)} \frac{U_2}{X_C} \sin \Psi$$



Tipos de FACTS (Flexible AC Transmission System)

Sistemas de transmisión flexible en corriente alterna

Función	Controladores FACTS y equipo convencional
Control de Voltaje: Normalmente este control requiere de una capacidad continua, incremental de alta velocidad, de tal forma que para prevenir una inestabilidad potencial en el voltaje, se puede requerir de la aplicación de un SVC, o bien de un STATCOM	- Plantas generadoras - Cambiadores de Taps en transformadores de tipo convencional - Bancos de capacitores convencionales - Compensador estático de VARs (SVC) - Compensador estático síncrono (STATCOM) - Controlador unificado de flujo de potencia (UPFC) - Superconductor de energía (SMES) - Sistema de almacenamiento de energía en batería (BESS) - Compensador estático convertible
Control de flujo de potencia: En el control del flujo de potencia, los requisitos de velocidad de respuesta son mínimos y se pueden lograr mediante el uso de equipo convencional (capacitares o reactores en serie), también con transformadores reguladores de ángulo de fase.	- Plantas generadoras - Compensación serie convencional - Capacitor serie controlado por tiristores (TCSC) - Reactor en serie controlado por tiristores (TCSR) - Cambiador de fase controlado por tiristores (TCPST) - Controlador unificado de flujo de potencia (UPFC) - Compensador serie estático síncrono (SSSC)

Estabilidad transitoria

- Capacitor serie convencional
- Resistencia controlada por tiristores (TCBR)
- Compensador estático de VARs (SVC), compensador estático síncrono (STATCOM) TCSE
- Métodos convencionales: Sistemas de excitación. Seccionamiento de líneas de Transmisión.

Estabilidad dinámica:

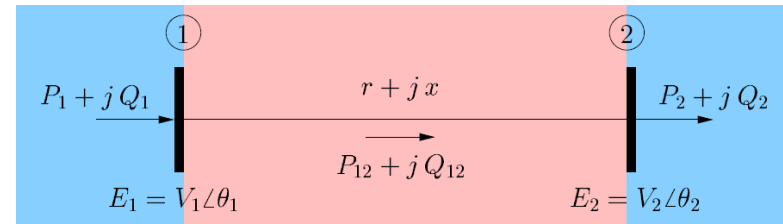
Cuando se tienen problemas potenciales de estabilidad dinámica, se requiere normalmente del uso de controles suplementarios, esto se puede lograr en ocasiones con equipo convencional, como por ejemplo con el uso de capacitores serie, pero si es necesario tener una mejor respuesta que amortigüe sensiblemente las oscilaciones de potencia, se pueden usar SVC, STATCOM, TCSC o algún otro controlador a base de electrónica de potencia.

- Capacitor serie convencional
- Estabilizador de sistemas de potencia
- TCSC, SVC, STATCOM, UPFC



2. Flujo de Potencia

- El problema de Flujo de Potencia o flujo de Carga consiste en determinar las condiciones de operación estática de un sistema eléctrico, o sea el Estado del Sistema Eléctrico.
- Las variables de estado son el modulo y Angulo de tensión (V y θ) en cada una de las barras. Consecuentemente se encuentra las potencias activas y reactivas (P y Q) que fluyen por las líneas de transmisión.



2.1 Modelamiento de los Componentes del SEP

Para el análisis de sistemas eléctricos de Potencia es necesario modelar matemáticamente los diferentes elementos que constituyen un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) y luego aplicar técnicas matemáticas específicas y eficientes para determinar el estado de las redes eléctricas en régimen permanente (Cálculo de Flujo de Carga).

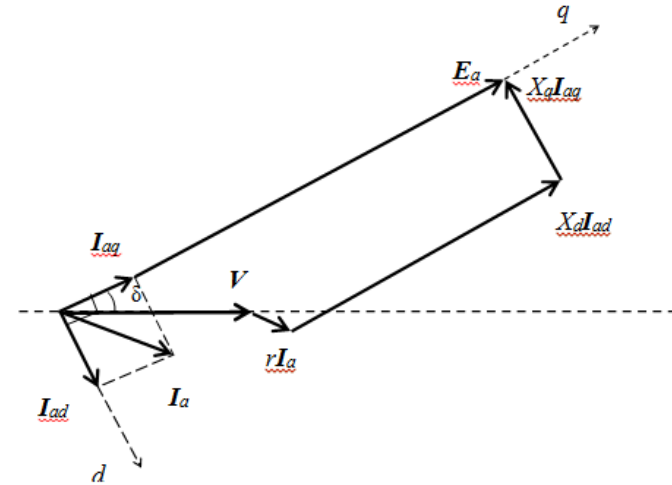
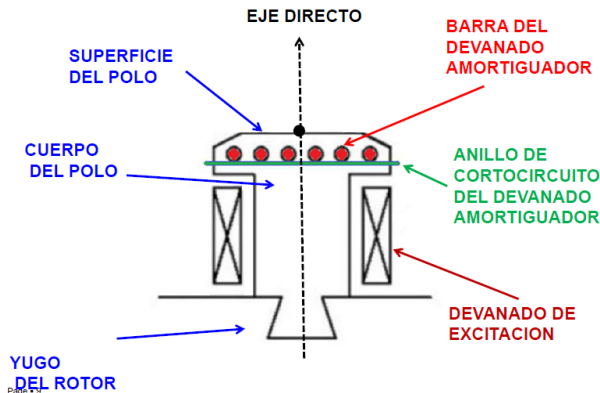
- Modelamiento Maquinas Síncronas.
- Modelamiento Líneas de Transmisión.
- Modelamiento Transformadores.
- Modelamiento Equipos de Compensación Reactiva.
- Modelamiento de las Cargas.

2.1.1 Modelo del Generador

DEVANADO AMORTIGUADOR



BOBINA DE EXCITACION

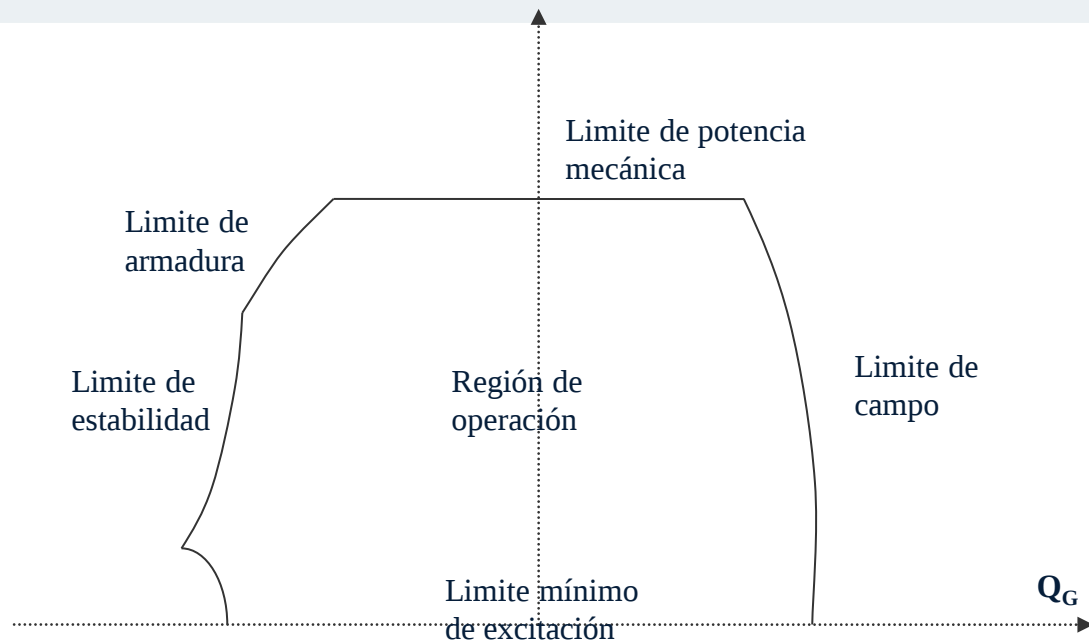


$$S_G = P_G + jQ_G = V \cdot I_a^*$$

$$P = \frac{VE_a}{X_d} \sin \delta + \frac{V^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d \cdot X_q} \right) \sin 2\delta$$

$$Q = \frac{VE_a}{X_d} \cos \delta + \frac{V^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d \cdot X_q} \right) \cos 2\delta - \frac{V^2}{2} \left(\frac{X_d + X_q}{X_d \cdot X_q} \right)$$

Curva de Capabilidad completa del Generador Síncrono



$$R = m + 2.s.\cos\delta$$

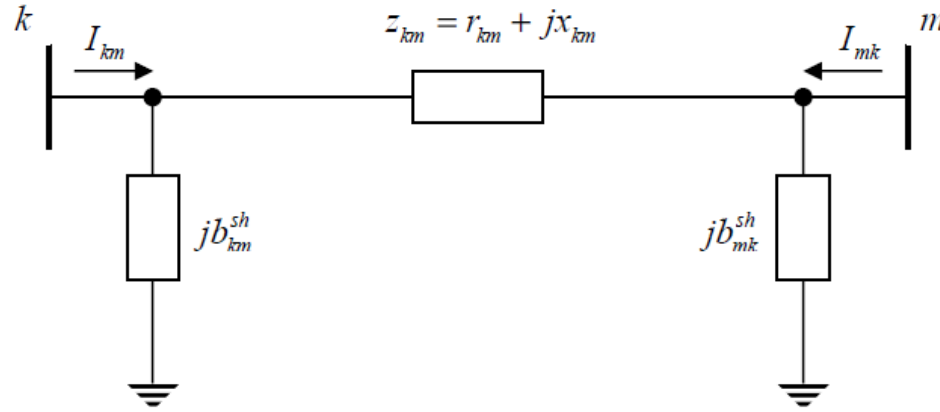
$$P_{mec\ MAX} = k.S_g\ NOM$$

$$(V.I_{aMAX}^*)^2 = P^2 + Q^2$$

$$P_{max}^2 = -\frac{\left(\frac{V^2}{X_q} + Q\right)^3}{\frac{V^2}{X_d} + Q}$$

$$P^2 + (Q + n)^2 = s^2$$

2.1.2 Modelo de la L. de T. para implementar FP



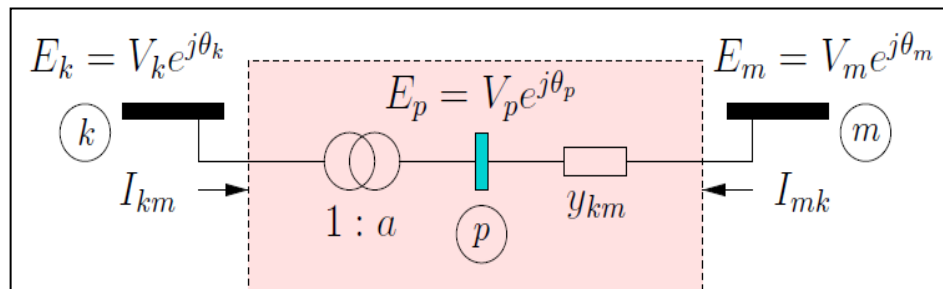
$$y_{km} = g_{km} + jb_{km} = z^{-1} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} - j \frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2}$$

$$I_{km} = y_{km}(\bar{V}_k - \bar{V}_m) + jb_{km}^{sh} \bar{V}_k$$

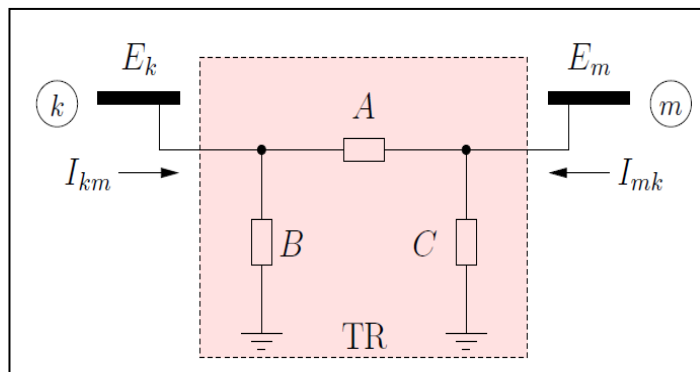
$$I_{mk} = y_{km}(\bar{V}_m - \bar{V}_k) + jb_{km}^{sh} \bar{V}_m$$

2.1.3 Modelo del Transformador

En este modelo se tiene una barra ficticia p , relación de transformación " a " y la admitancia serie Y_{km} . Además se cumple:



$$\frac{E_k}{E_p} = \frac{1}{a} = -\frac{I_{mk}}{I_{km}} = \frac{I_{pm}}{I_{km}}$$



$$A = a y_{km}$$

$$B = a(a - 1) y_{km}$$

$$C = (1 - a) y_{km}$$

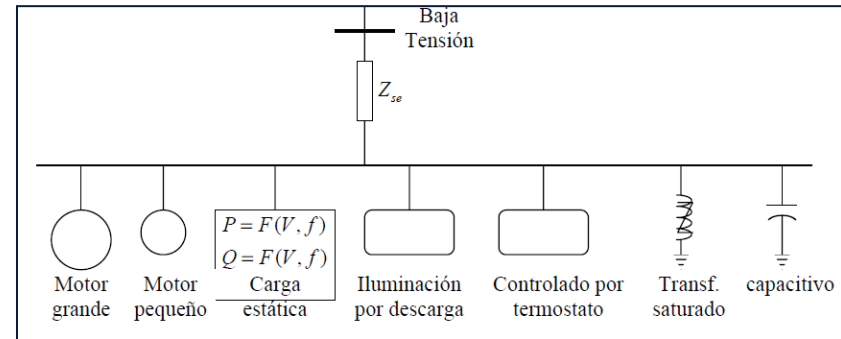
2.1.4 Cargas

Modelo exponencial: El modelo de carga estática expresa las características en cualquier instante del tiempo.

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^a$$

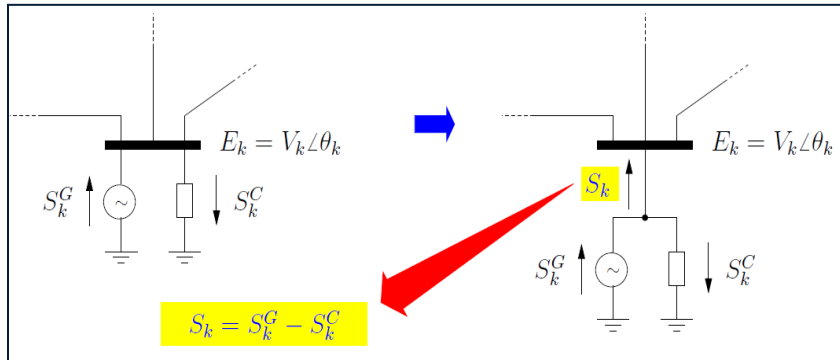
$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^b$$

Modelo de carga Dinámica: Hay algunos casos donde es necesario tener las componentes dinámicas de las cargas. Estudios de oscilaciones entre-áreas, estabilidad de tensión y estabilidad de largo plazo, con frecuencia requieren que las cargas sean modeladas en forma dinámica. Algunos de los componentes dinámicos de carga en baja tensión, son:



2.1.5 Barras

Se definen 4 variables en cada Barra correspondientes a la tensión y inyecciones de potencia en cada barra



En toda barra, dos variables son conocidas y las otras dos deben ser calculadas:

Barra V θ : (Barra de Holgura ó Slack): donde V y θ especificados; P y Q desconocidos (por conveniencia este será el nodo 1, también $\theta_1 = 0$ como referencia).

Barra PQ: barra de carga con P y Q especificados y V , θ desconocidos.

Barra PV: barra de generación con P y V especificados y Q y θ desconocidos.

Hay veces es necesario utilizar una barra adicional, llamada **Barra ficticia**, el cual será de tipo P-Q con valores de carga cero.

2.2 Ecuaciones de Flujo de Potencia Activa y Reactiva

- Desde el punto de vista matemático, el Problema de Flujo de Potencia (FP) consiste en resolver un conjunto de ecuaciones no lineales las cuales describen a un Sistema Eléctrico de Potencia bajo condiciones de estado estable.

2.2.1 Ecuaciones para la Potencia Activa y Reactiva en una Línea de Transmisión

Con la ecuación de la corriente en una línea I_{km} entre las barras k y m , se puede calcular P_{km} y Q_{km}

$$\bar{I}_{km} = y_{km}(\bar{V}_k - \bar{V}_m) + jb_{km}^{sh} \bar{V}_k$$

$$\bar{S}_{km}^* = P_{km} - jQ_{km} = \bar{V}_k^* \bar{I}_{km}$$

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km})$$

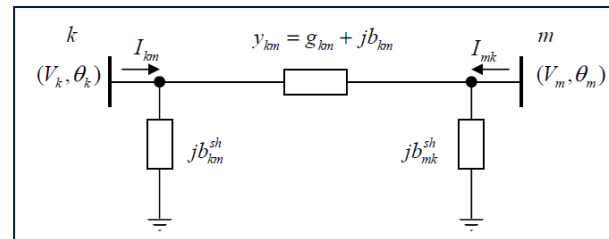
$$Q_{km} = -V_k^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m (-g_{km} \sin \theta_{km} + b_{km} \cos \theta_{km})$$

Donde:

V_k : Magnitud del voltaje en el nodo k

θ_k : ángulo de tensión en el nodo k

$g_{km} + jb_{km}$ Elemento de matriz de admitancias nodal



2.2.2 Ecuaciones de Flujo de Potencia en un Transformador

- La corriente y la Potencia compleja en el transformador esta dado por las ecuaciones siguientes

$$\bar{I}_{km} = a_{km} y_{km} (a_{km} \bar{V}_k - \bar{V}_m)$$

$$\bar{S}_{km}^* = P_{km} - jQ_{km} = \bar{V}_k^* \bar{I}_{km}$$

$$P_{km} = (a_{km} V_k)^2 g_{km} - a_{km} V_k V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km})$$

$$Q_{km} = -(a_{km} V_k)^2 b_{km} + a_{km} V_k V_m (-g_{km} \sin \theta_{km} + b_{km} \cos \theta_{km})$$

- METODOS DE SOLUCION DE LAS ECUACIONES DE FP**

- Gauss y Gauss-Seidel.

- Newton Raphson.

- Desacoplado.

- SOFTWARE ESPECIALIZADO**

- Uso del DIGSILENT.

- Uso del ETAP.

- Uso del NEPLAN.

- Uso del MATPOWER.

METODO DE NEWTON RAPHSON

$$\begin{aligned}x^{(\nu+1)} - x^{(\nu)} &= \Delta x^{(\nu)} \\x^{(\nu+1)} &= x^{(\nu)} + \Delta x^{(\nu)} \\x^{(\nu+1)} &= x^{(\nu)} - \frac{g(x^{(\nu)})}{g'(x^{(\nu)})}\end{aligned}$$

Los pasos del algoritmo de solución para el caso n-dimensional son básicamente los mismos del caso unidimensional. La diferencia está en el paso 4) en que se realiza la linealización de $g(x)$ en torno de $x = x^{(\nu)}$ y está dada por:

$$g(x^{(\nu)} + \Delta x^{(\nu)}) \approx g(x^{(\nu)}) + J(x^{(\nu)}) \cdot \Delta x^{(\nu)}$$

El vector de corrección Δx es calculado con la aproximación de Taylor:

$$g(x^{(\nu)}) + J(x^{(\nu)}) \cdot \Delta x^{(\nu)} = 0$$



$$\Delta x^{(\nu)} = -[J(x^{(\nu)})]^{-1} \cdot g(x^{(\nu)})$$

Aplicación al flujo de potencia

$$P_k = V_k \sum_{m \in \mathcal{K}} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km})$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \in \mathcal{K}} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km})$$

$$k = 1, \dots, \text{NB}$$

$$P_k^{esp} - V_k \sum_{m \in \mathcal{K}} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) = 0, \text{ para barras PQ e PV}$$

$$Q_k^{esp} - V_k \sum_{m \in \mathcal{K}} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) = 0, \text{ para barras PQ}$$

$$\Delta P = P^{esp} - P(V, \theta) = 0$$

$$\Delta Q = Q^{esp} - Q(V, \theta) = 0$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P^\nu \\ \Delta Q^\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} \end{bmatrix}^{(\nu)} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta^\nu \\ \Delta V^\nu \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}(x^\nu) = \begin{bmatrix} \boxed{\frac{\partial(\Delta P)}{\partial \theta}} & \boxed{\frac{\partial(\Delta P)}{\partial V}} \\ \boxed{\frac{\partial(\Delta Q)}{\partial \theta}} & \boxed{\frac{\partial(\Delta Q)}{\partial V}} \end{bmatrix}^{(\nu)}$$

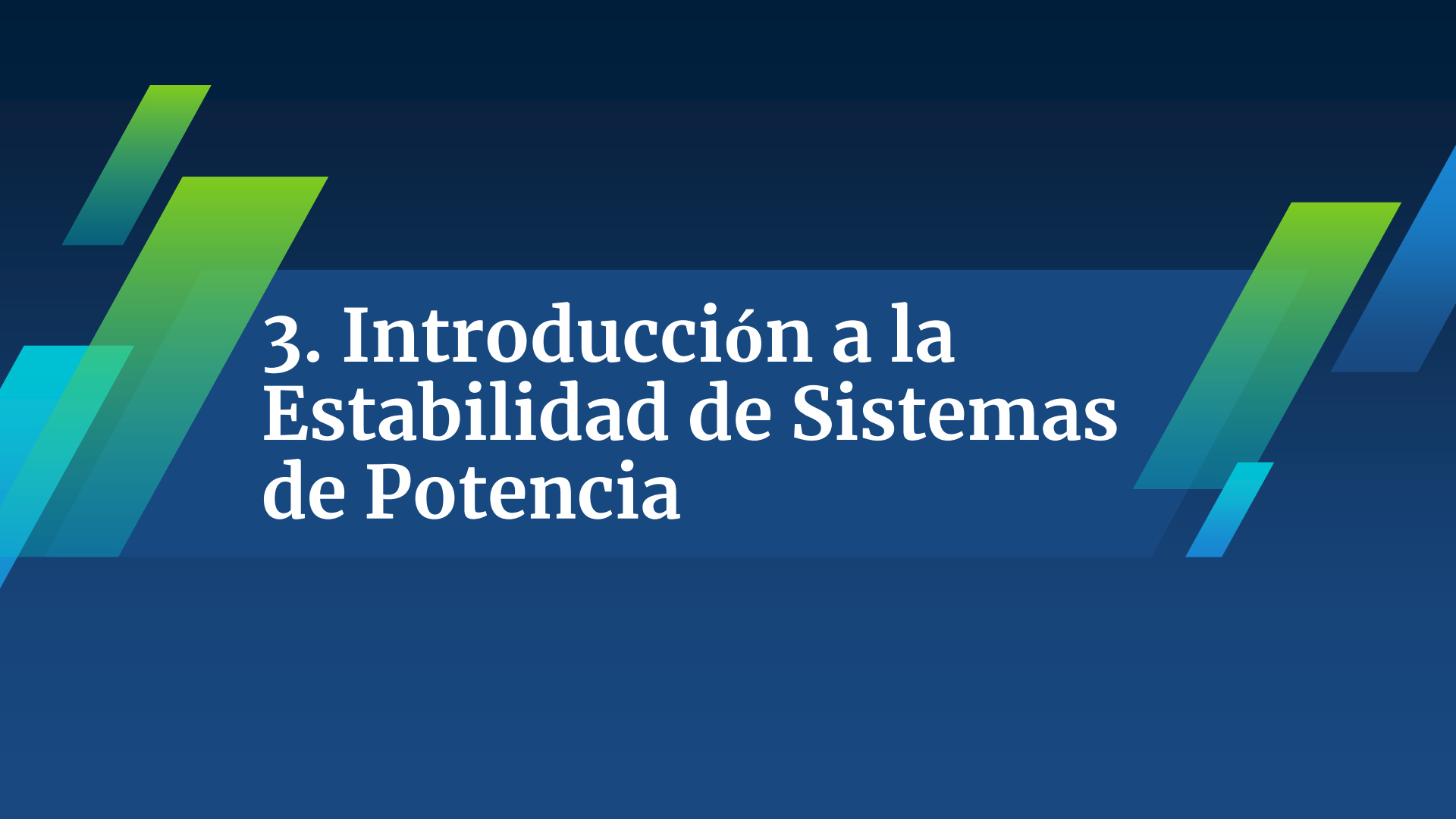
Algoritmo de solución

- i) Iniciar valores para V y θ
- ii) Calcular ΔP y ΔQ
 Si: ΔP y $\Delta Q < \varepsilon \rightarrow$ Solución !!
- iii) Caso contrario, RESOLVER

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J(\cdot)] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$
- iv) Actualizar
 $\theta \leftarrow \theta + \Delta \theta$
 $V \leftarrow V + \Delta V$
- v) Volver para ii)

La matriz Jacobiana

$$J(\cdot) = \begin{bmatrix} \boxed{\frac{\partial(\Delta P)}{\partial \theta}} & \boxed{\frac{\partial(\Delta P)}{\partial V}} \\ \boxed{\frac{\partial(\Delta Q)}{\partial \theta}} & \boxed{\frac{\partial(\Delta Q)}{\partial V}} \end{bmatrix}$$



3. Introducción a la Estabilidad de Sistemas de Potencia

Definiciones

Punto de operación o Condición de Operación de un SEP

Es un grupo de magnitudes que pueden ser medidas y calculadas, que permiten describir o caracterizar al SEP.

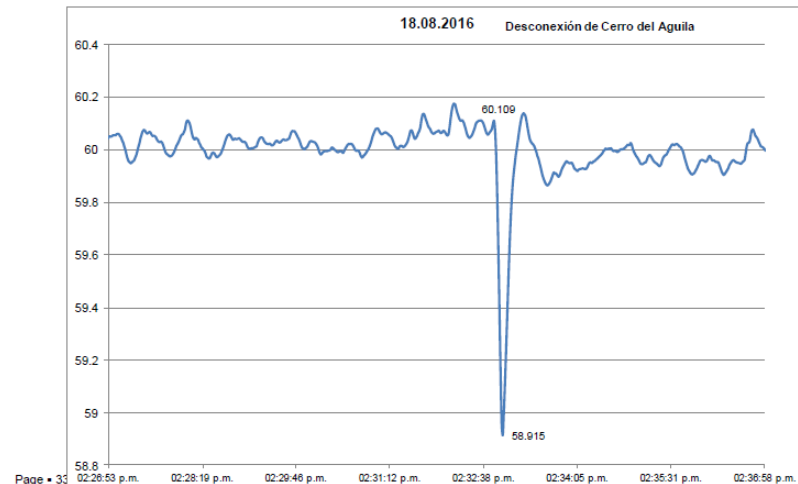
Condición de Operación en estado estacionario de un SEP

Es un estado en el cual todas las magnitudes que caracterizan al sistema pueden ser consideradas constantes para propósitos de análisis.

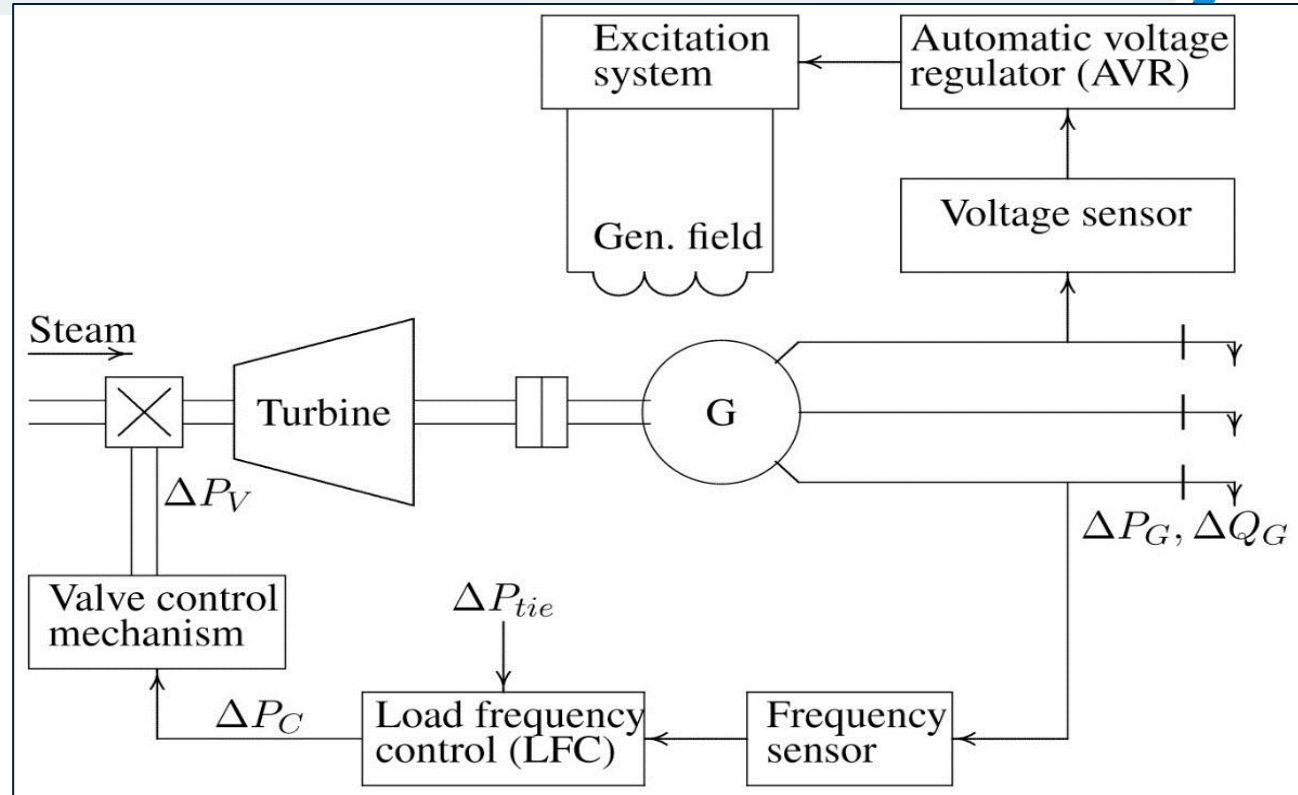
Operación Síncrona

Una maquina esta en operación síncrona con la red, si su velocidad angular eléctrica promedio es igual a la frecuencia angular eléctrica de la tensión de la red alterna

(7) Desconecto la CH Cerro del Águila con 488.17 MW, actuó el Esquema de Rechazo Automático de Carga por Mínima Frecuencia desconectando 327.1 MW (jueves 18 de agosto de 2016)



3.1 Elementos de estabilidad del SEP



2.2.1 MODELO DEL GENERADOR

Para definir el modelo del generador podemos partir de la ecuación de movimiento de una máquina síncrona para pequeñas perturbaciones:

$$\frac{2H}{w_s} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (2.1)$$

Siendo:

P_m Potencia mecánica aplicada por la turbina en el eje (W)

P_e Potencia eléctrica generada (W)

w_s Velocidad angular nominal del rotor (rad/s)

δ Posición angular del rotor (rad)

H Constante de inercia del generador (W·s/VA)

La constante de inercia del generador (H) se define como la energía cinética a velocidad nominal entre la potencia nominal del generador, siendo J el momento de inercia del generador en kg/m²:

$$H = \frac{\text{Energía cinética a vel. nominal (W} \cdot \text{s)}}{\text{Potencia base (VA)}} = \frac{\frac{1}{2} J w_s^2}{S_{base\ gen}} \quad (2.2)$$

3.1.1 Control Primario de Frecuencia

Si consideramos notación en p.u. para la ecuación (2.3):

$$\frac{d\Delta w}{dt} = \frac{1}{2H}(\Delta P_m - \Delta P_e) \quad (2.4)$$

Aplicando transformada de Laplace se obtiene:

$$\Delta w(s) = \frac{1}{2Hs}[\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s)] \quad (2.5)$$

En la figura 2.2 se representa un diagrama de bloques con la relación obtenida

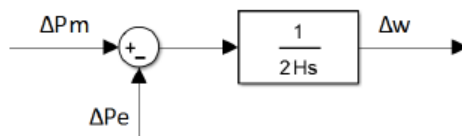
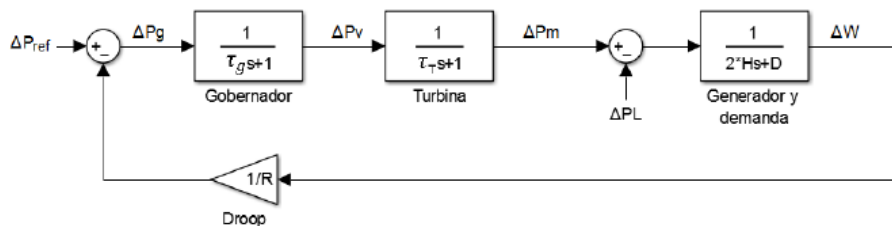


Figura 2.2 Modelo del Generador



3.1.2 Control Secundario de Frecuencia

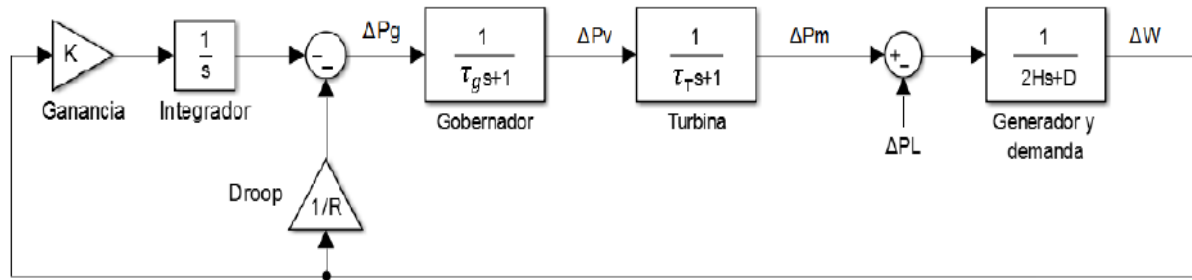
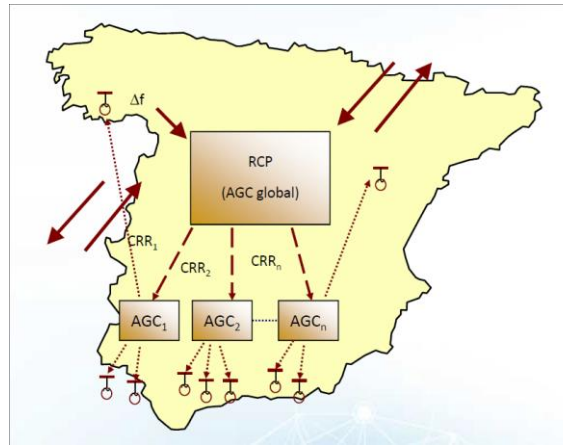


Figura 3.30 Modelo de una central aislada con control integral de la frecuencia



3.2 Regulación primaria, secundaria y terciaria

La regulación de frecuencia debe conseguir que:

Se mantenga el equilibrio entre generación y demanda

Se mantenga la frecuencia de referencia en el sistema

Se cumplan los compromisos de intercambio de energía con las áreas vecinas

Se mantenga la suficiente energía de reserva

■ Regulación Primaria de Frecuencia

Es el más rápido, operando en un margen de tiempo de entre 2 y 20 segundos. Actúa de forma local en cada generador síncrono, atendiendo a la velocidad de giro del eje. La rapidez de este control está limitada por la propia inercia de los generadores.

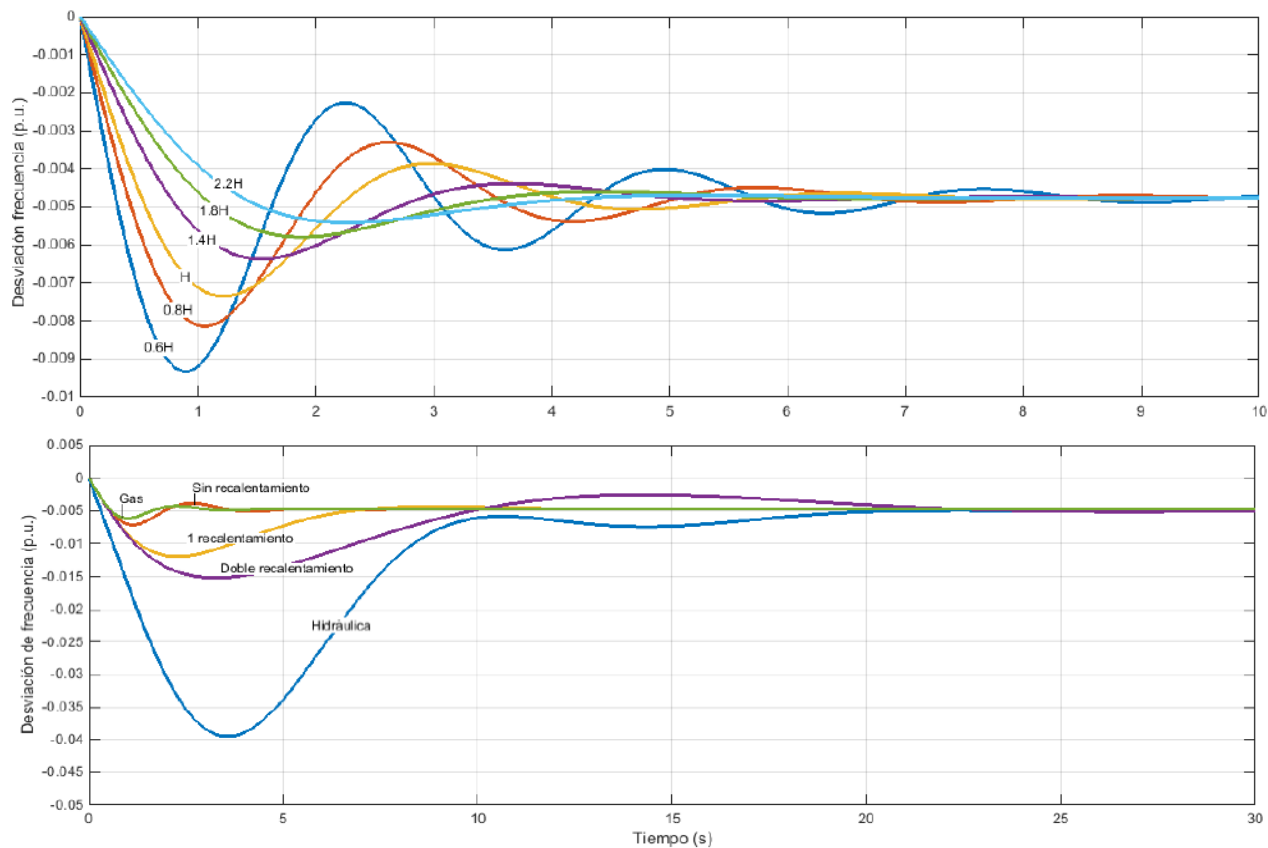
■ Regulación Secundaria de Frecuencia

Opera en un margen de tiempo de entre 20 segundos y 2 minutos. Actúa en el ámbito del área de control, atendiendo a la frecuencia y al intercambio de potencia con las áreas vecinas.

■ Regulación Terciaria de Frecuencia

Opera en un margen de tiempo superior a 10 minutos. Actúa en el ámbito de un sistema eléctrico extenso, buscando un reparto de cargas optimizado que asegure suficientes reservas de energía.

Resultados de Simulación RPF



Resultados de Simulación RSF

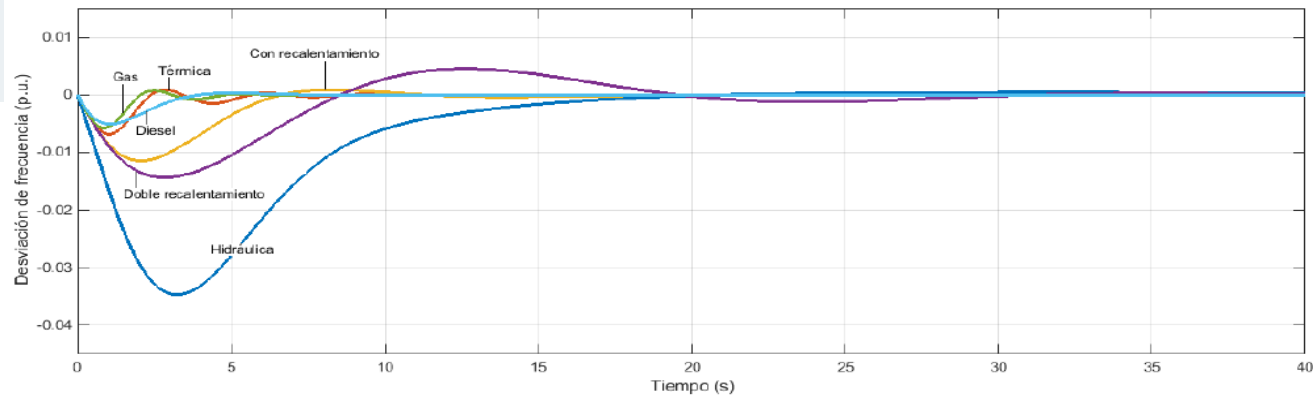


Figura 3.34 Variación de la frecuencia en centrales con AGC para aumento en la demanda del 10%

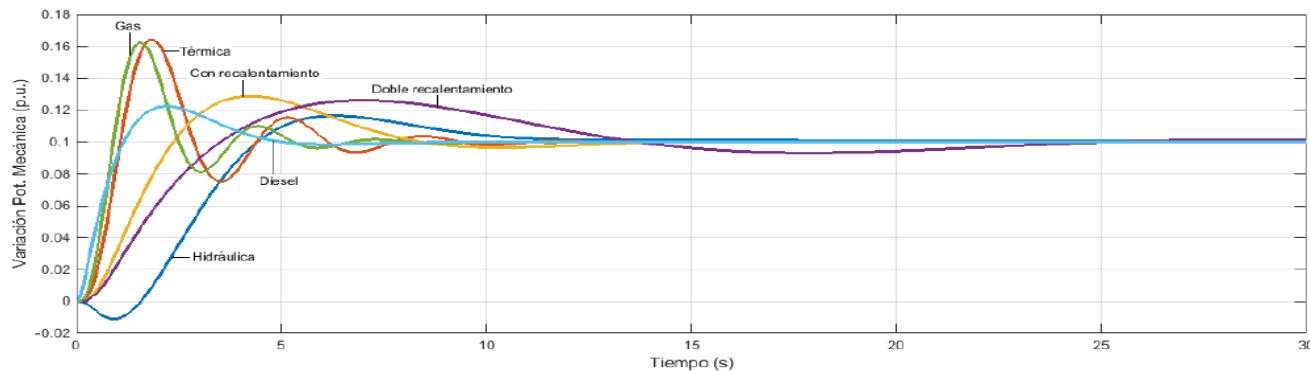
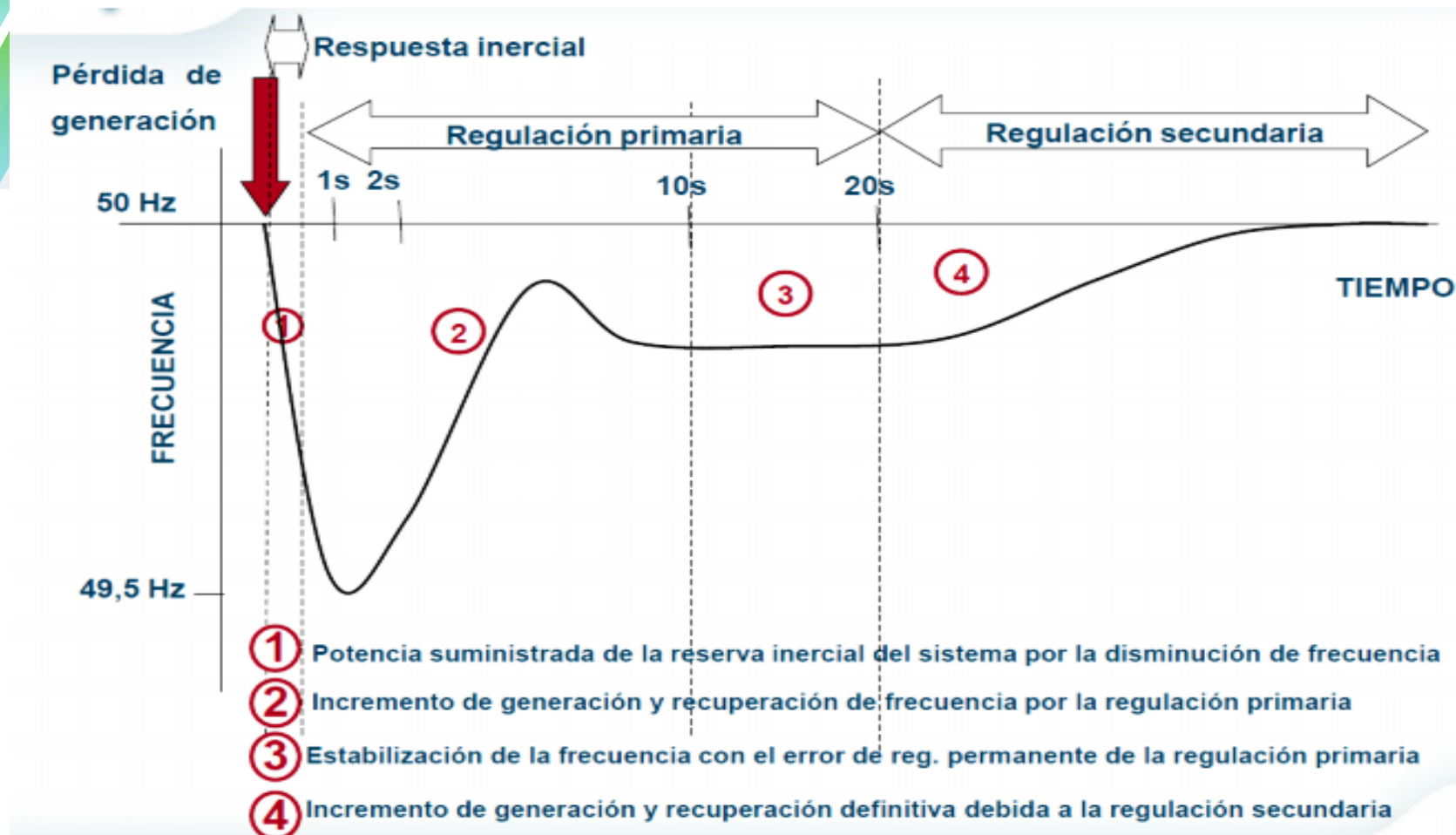
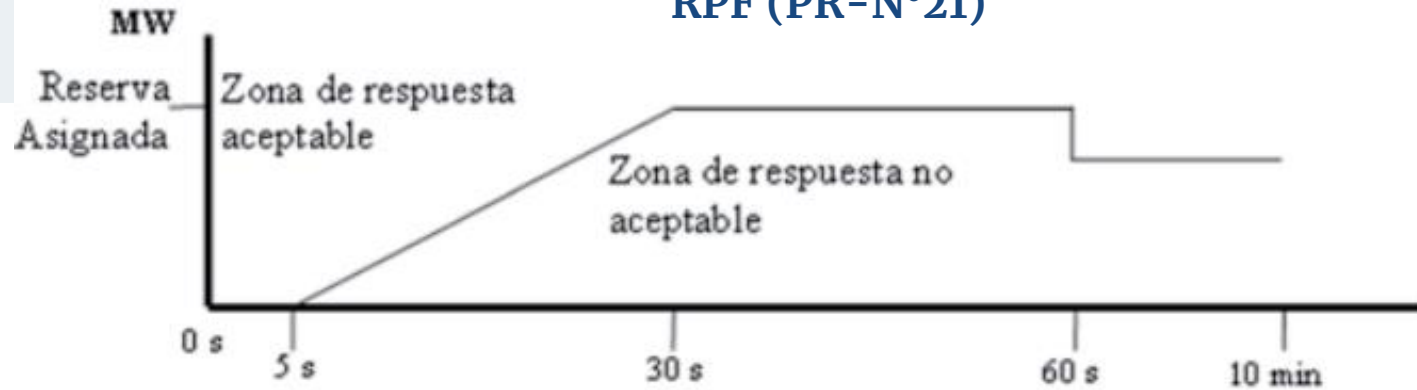


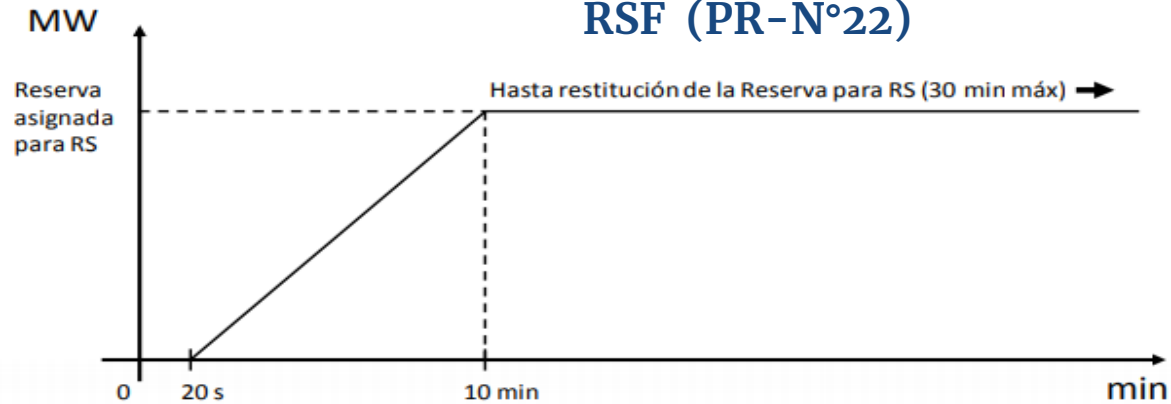
Figura 3.35 Variación potencia mecánica en centrales con AGC para aumento en la demanda del 10%



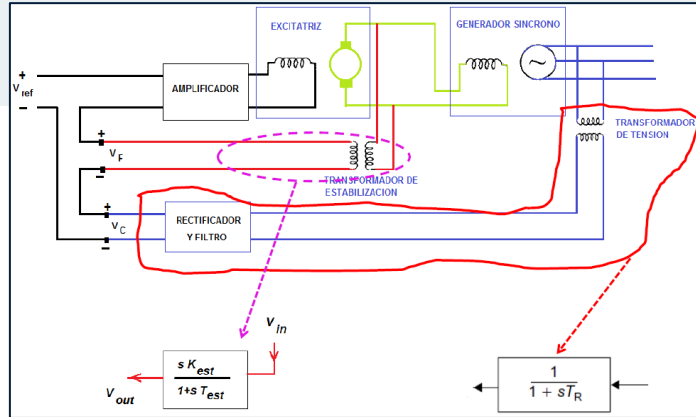
RPF (PR-N°21)



RSF (PR-N°22)

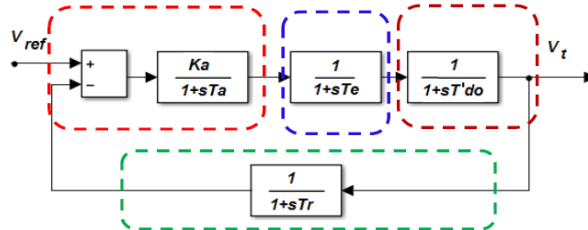


Regulación de Tensión



ESTABILIDAD DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN EN LAZO ABIERTO

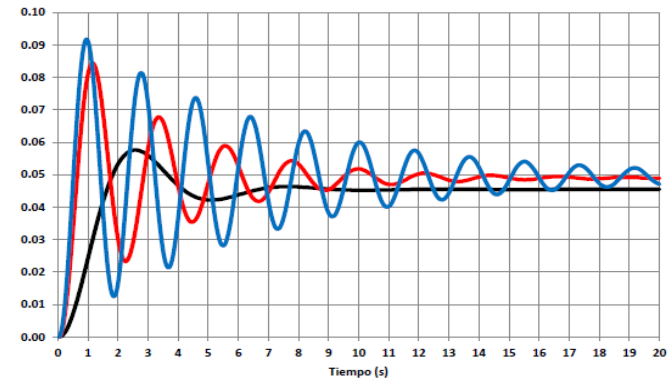
SERT TIPO DC1 SIN LAZO DE ESTABILIZACION



Los principales parámetros son: $T_a = 0.05 \text{ s}$; $T_e = 1.0 \text{ s}$; $T'do = 6 \text{ s}$ y $T_r = 0.02 \text{ s}$. El lugar geométrico de las raíces muestra que cuando la ganancia llega al valor $K_a = 105$ la parte real es cero.

Aplicando un escalón de 0.05 p.u. a la referencia se obtiene:

RESPUESTA A ESCALON DE 0.05 P.U.

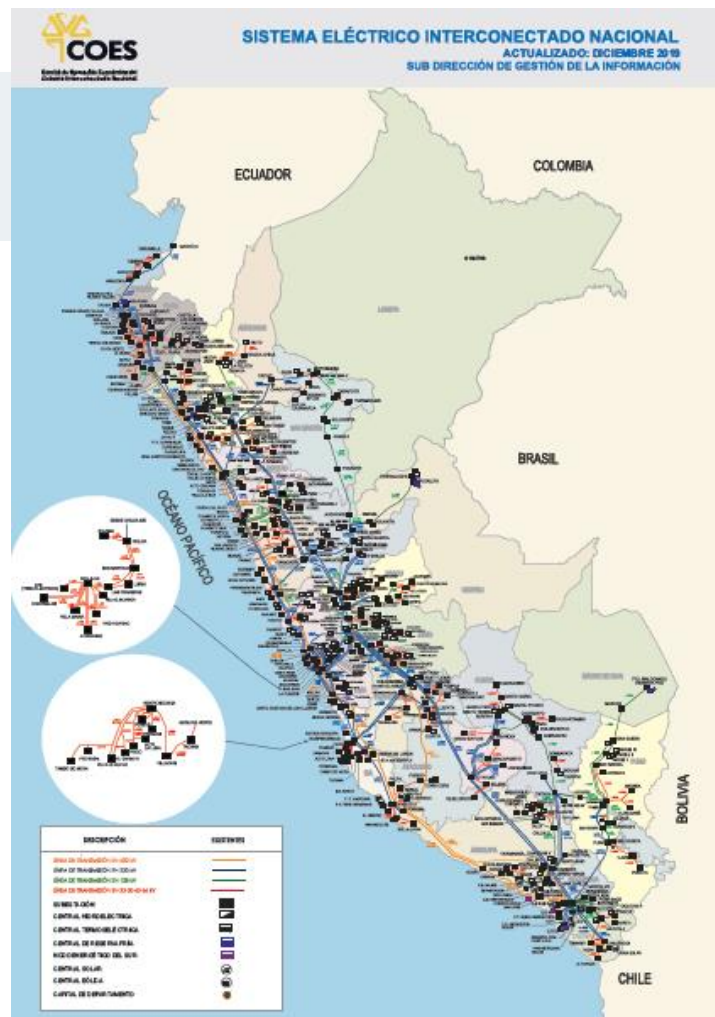


— $K_a = 10$ — $K_a = 50$ — $K_a = 75$



4. El sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN)

El Sistema Eléctrico Interconectado Nacional de Perú o SEIN es el conjunto de líneas de transmisión y subestaciones eléctricas conectadas entre sí, así como sus respectivos centros de despacho de carga, el cual permite la transferencia de energía eléctrica entre los diversos sistemas de generación eléctrica de Perú.



4.1 Estructura Organizacional del SEIN

El sector se encuentra conformado por cinco actores principales:

Empresas Eléctricas:

Estas se encuentran orientadas a las actividades de generación, transmisión y distribución.

Clientes:

Pueden ser divididos a su vez en clientes libres y clientes regulados.

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN):

Es la institución encargada de supervisar, regular, fiscalizar y sancionar a las empresas que se desarrollan en el sector eléctrico, hidrocarburos y minero.

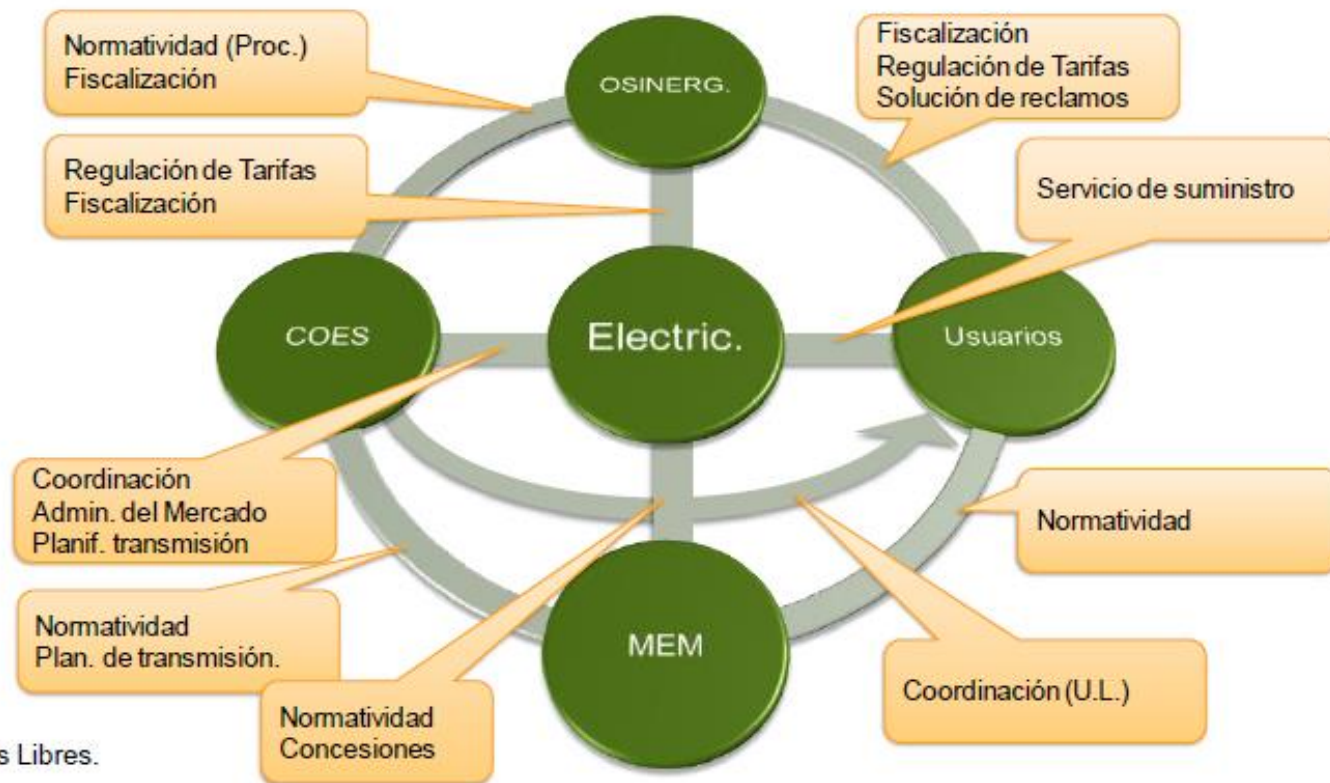
Comité de Operación Económica del Sistema (COES):

Este organismo tiene como finalidad coordinar las operaciones al mínimo costo, garantizando la seguridad en el abastecimiento; su labor es de naturaleza técnica.

Ministerio de Energía y Minas (MINEM):

Es la entidad encargada de la representación del estado peruano a través de la Dirección General de Electricidad, este organismo cumple con labores normativas y es el responsable del otorgamiento de concesiones y autorizaciones.

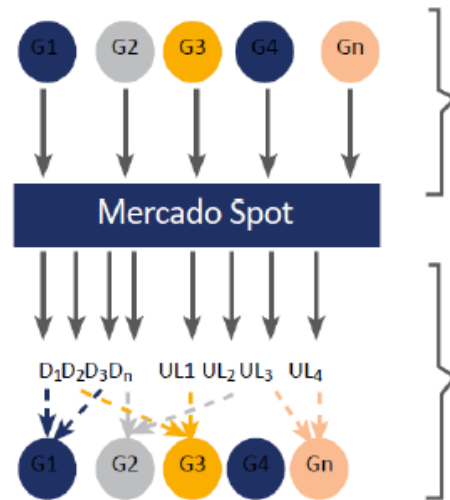
Interrelación entre Actores del Sector Eléctrico Peruano



U.L.: Usuarios Libres.

4.2 Operación Comercial del SEIN

Coexisten: i) el mercado de corto plazo y ii) el mercado de contratos financieros.



Entregas

Los generadores (G1,G2,...,Gn) entregan energía al sistema en función a su costo variable

Retiros

Los retiros de energía se asignan a los generadores en función a los compromisos (contratos) que éstos han asumido con sus clientes, que pueden ser distribuidores (D) o usuarios libres (UL).

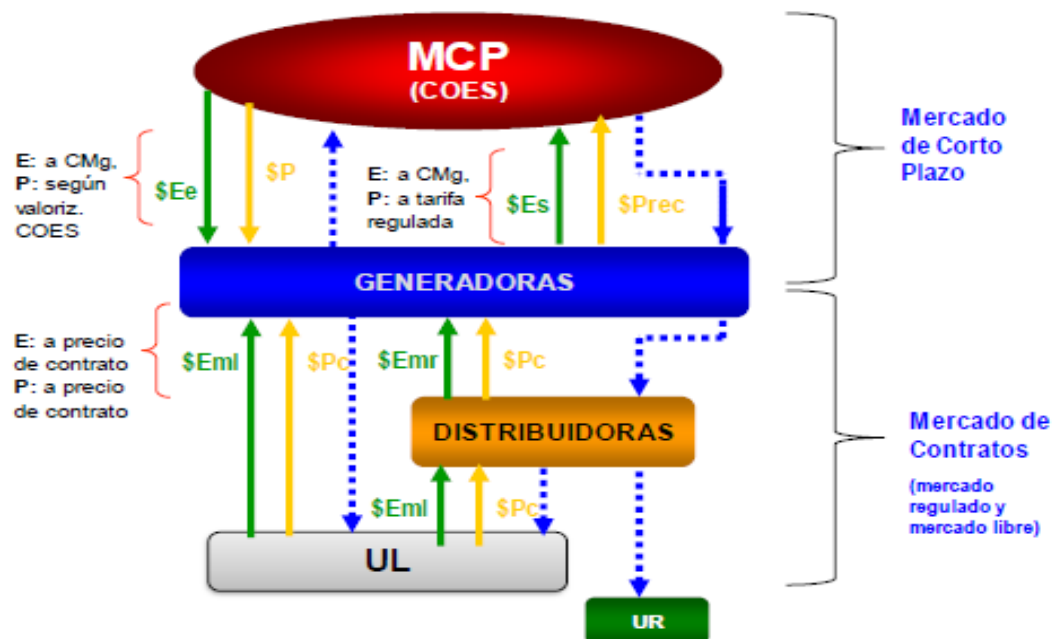
Usuario Regulado: Menor a 200 KW

U. Libre o Regulado: De 200 KW hasta 2 500 KW

Usuario Regulado: Mayor a 200 KW

4.2.1 Esquema Peruano:

Mercados de Electricidad



- \$Ee: Ingresos por Energía entregada.
- \$P: Ingresos por Potencia.
- \$Emr: Ingresos por Energía suministrada (mercado regulado).
- \$Eml: Ingresos por Energía suministrada (mercado libre).
- \$Pc: Cobro de Potencia.
- \$Es: Egresos por energía suministrada a clientes.
- \$Prec: Cálculo del Egreso por compra de potencia.

4.2.2 Incremento de la Demanda Eléctrica (DE)

Paso 0

Demanda
Vegetativa

Demanda
Grandes Cargas

Demanda
Cargas
Especiales e
Incorporadas

Demanda
Nuevos
Proyectos

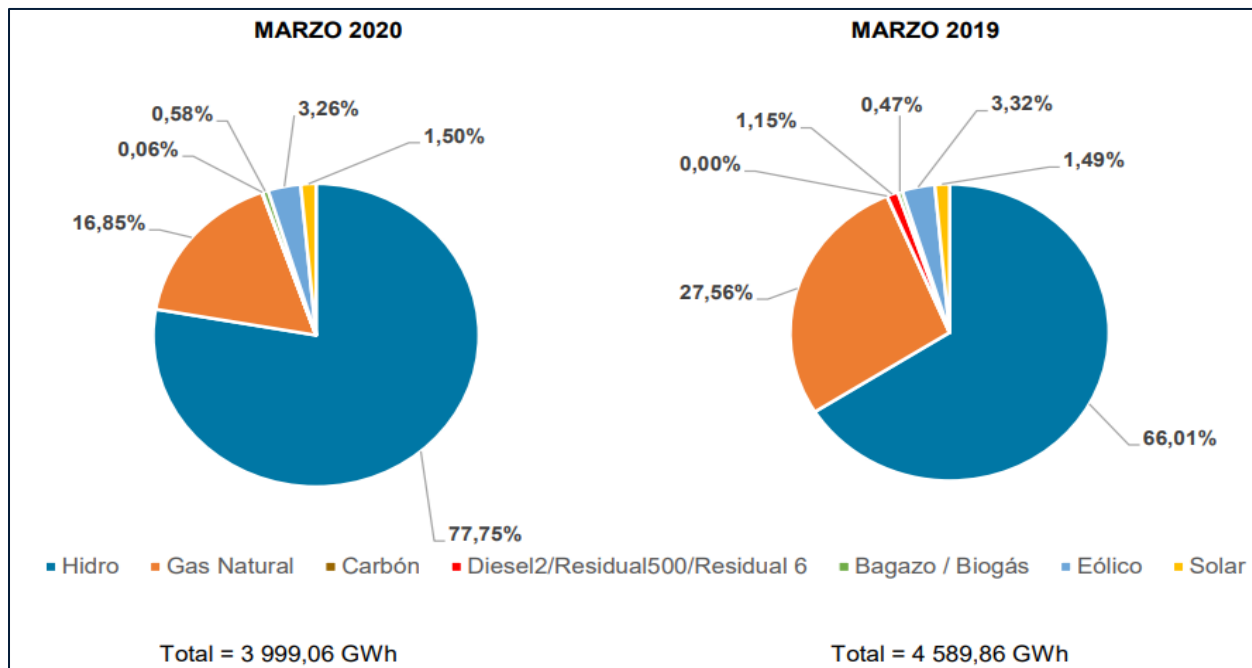
Demanda Eléctrica = f (PBI, otros)

PBI = Consumo + Inversiones + Gastos + (X-M)

DE = A*PBI + B*Tarifas + C*Población

4.3 Situación Actual del SEIN

- El total de la producción de energía eléctrica de la empresas generadoras integrantes del COES en el mes de marzo 2020 fue de 3 999,06 GWh, lo que representa una disminución de 590,80 GWh (-12,87%) en comparación con el año 2019.



4.3.1 Interconexiones

Las interconexiones internacionales del Perú con los países vecinos, tienen un alto potencial de desarrollo hacia el mediano y largo plazo. Se estima que, para la mayoría de futuros, hasta el año 2024 el SEIN contará con un sistema de transmisión de 500 kV con alcance geográfico cercano a las fronteras de varios de los países vecinos, y con oferta de generación suficiente que permitan tener capacidad de intercambio de electricidad con esos países, conforme a los acuerdos binacionales o regionales a los que se arribe.



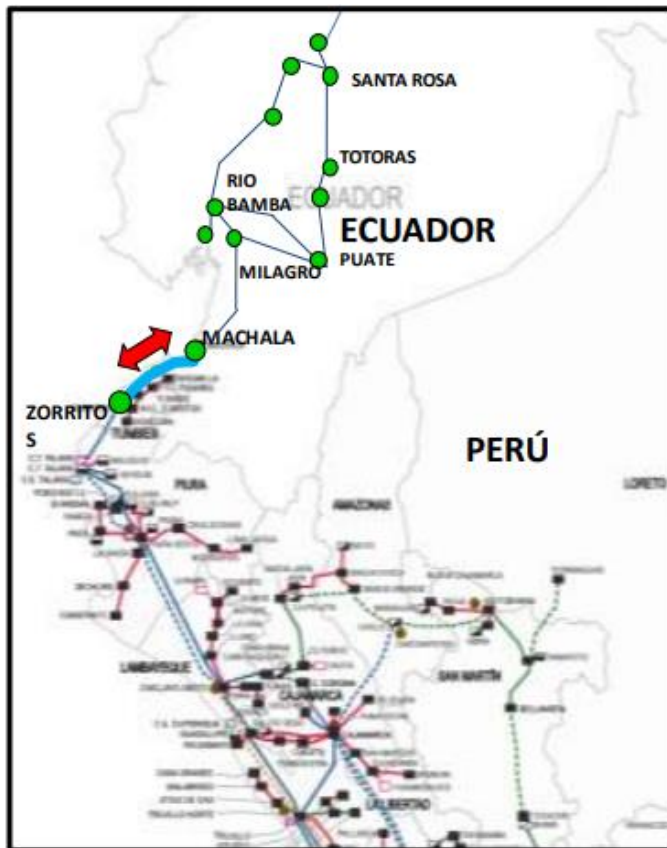


Figura 8.2 Enlace de Interconexión Perú – Ecuador Existente.

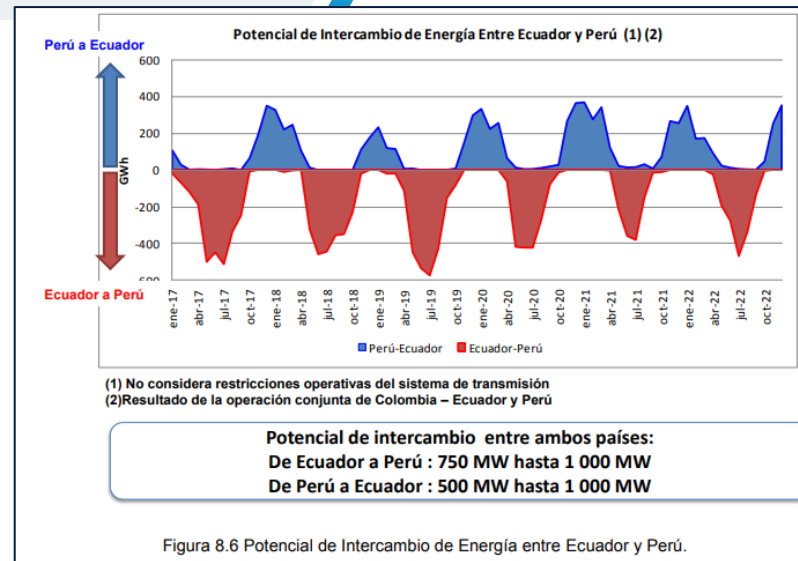
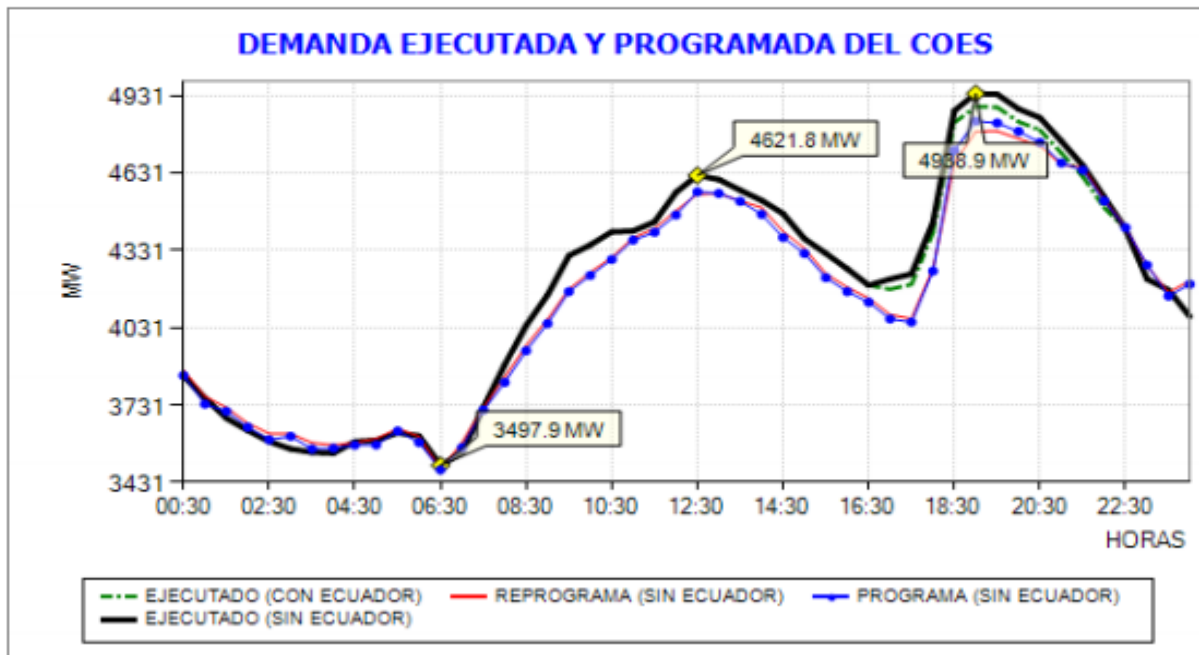


Figura 8.6 Potencial de Intercambio de Energía entre Ecuador y Perú.

4.3.2 Despacho del COES SINAC

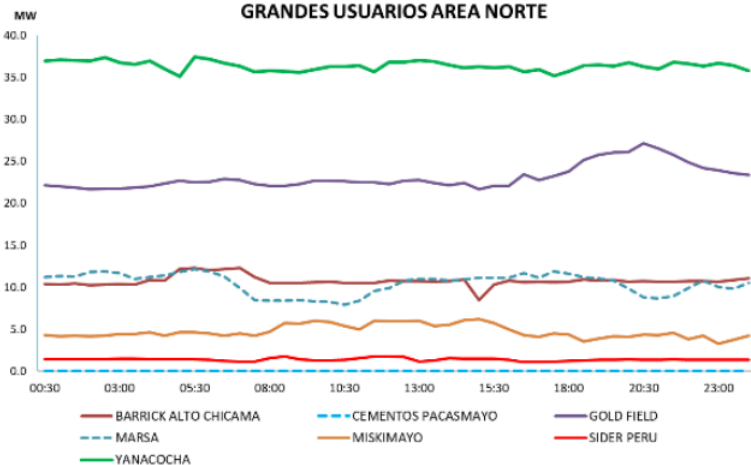
1.1.1. EVOLUCIÓN HORARIA DE LA DEMANDA TOTAL

Se muestra la evolución de la demanda en el día:

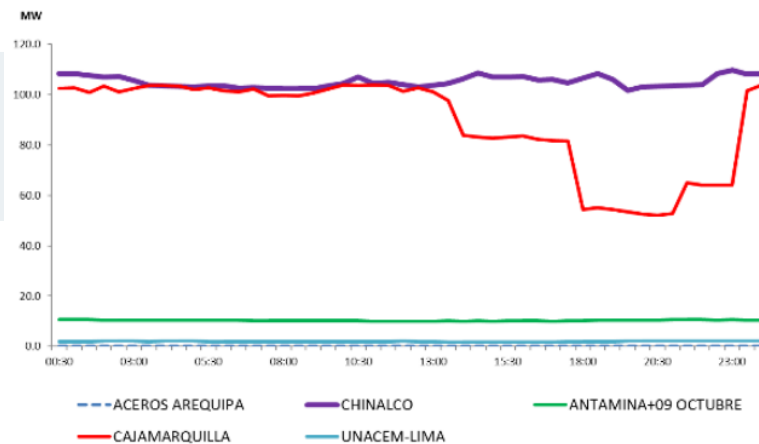


Programa : Emitido a las 18:44 h. del día 24.04.2020

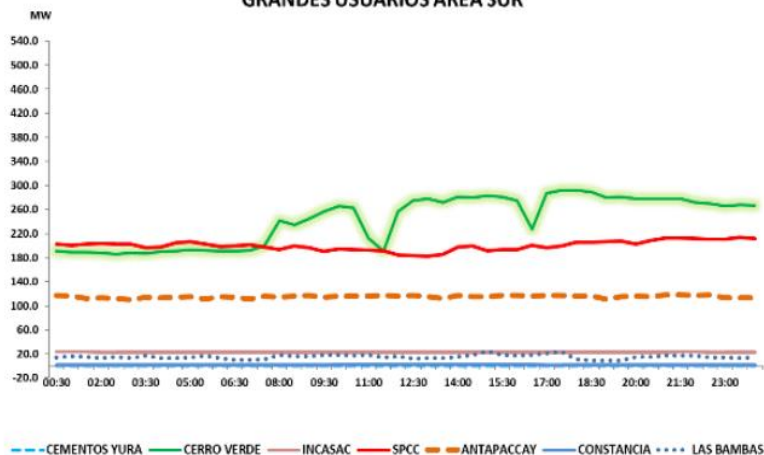
GRANDES USUARIOS AREA NORTE



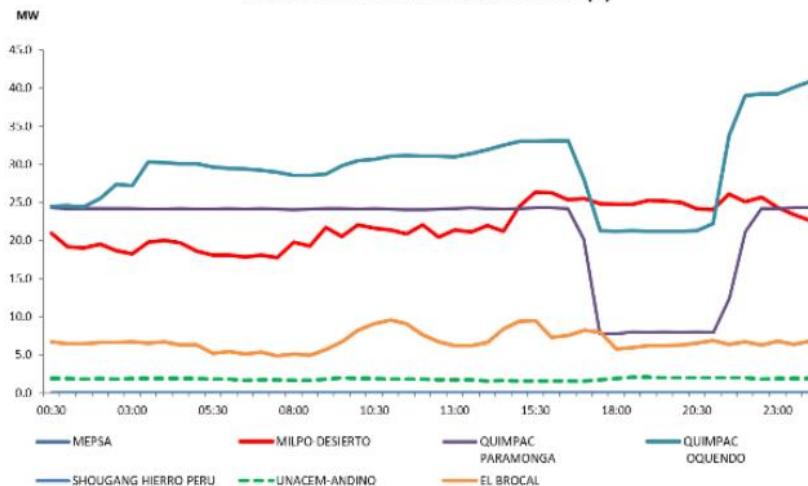
GRANDES USUARIOS AREA CENTRO (1)



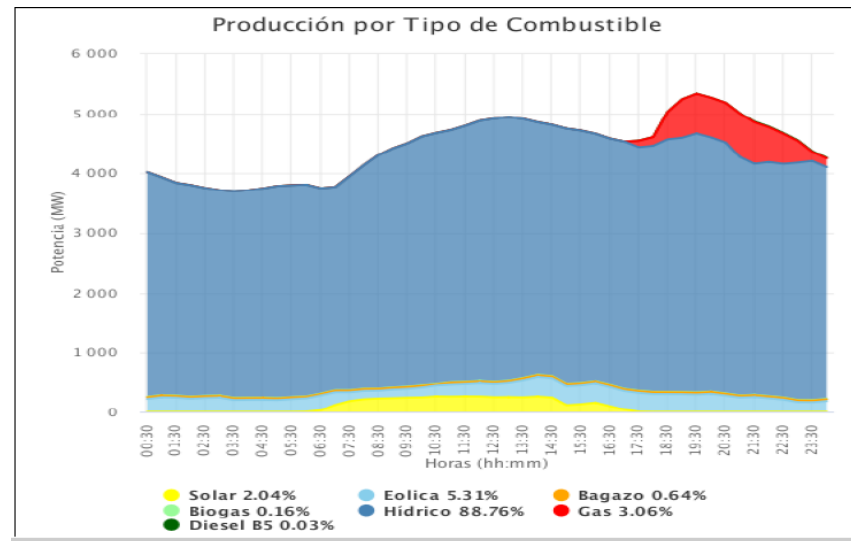
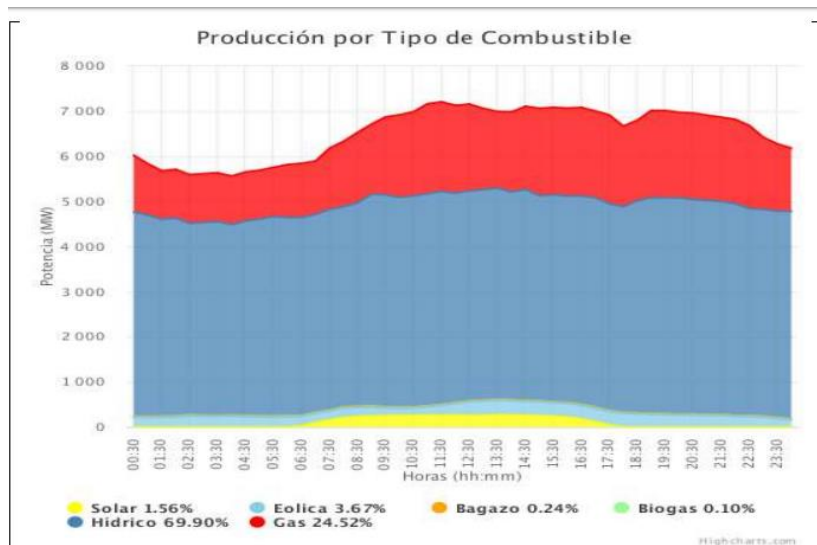
GRANDES USUARIOS AREA SUR



GRANDES USUARIOS AREA CENTRO (2)



4.3.3 Disminución del despacho del COES SINAC por el COVID-19



4.3.4 Principales Proyectos 2018-2024

PRINCIPALES PROYECTOS DE DEMANDA	2018		2019		2020		2021		2022		2023		2024	
	MW	GWH	MW	GWH	MW	GWH	MW	GWH	MW	GWH	MW	GWH	MW	GWH
Tia Maria (SPCC)											5	42	5	42
Los Chancas (SPCC)							5	42	5	42	50	416	50	416
Ampliación Concentradora Cujane (SPCC)									46	380	46	380	46	380
Ampliación Fundación Ilo (SPCC)							12	100	12	100	12	100	12	100
Ampliación El Brocal	1	41	4	88	8	129	8	129	8	129	8	129	14	195
Ampliación Shougang Hierro Perú (Op Mina y P. Be)	50	46	60	514	60	514	60	514	100	808	100	808	100	808
Ampliación Antamina	2	26	24	209	31	265	67	534	67	534	87	680	107	827
Ampliación Aceros Arequipa-Pisco	1	5	2	46	22	361	22	468	27	570	27	604	32	604
Ampliación Toromochi (Chinalco)			2	73	26	241	61	493	61	580	61	580	61	580
Fosfatos de Bayovar-CCPSA									30	218	60	436	60	436
Ampliación UNACEM-Condorcocha					9	52	10	107	26	188	26	234	26	234
Ampliación Las Bambas (MMG)			6	96	13	155	38	348	58	506	71	604	71	604
Corocohuayco-Antapaccay			3	12	28	140	32	244	34	273	43	344	39	314
Bongará-Milpo														
Mina Quechua													8	65
Quellaveco (Angloamerican)					10	13	47	107	162	713	162	1,112	163	1,214
San Gabriel (Ex Chucapaca, de Buenaventura)									10	70	12	84	15	105
Hilarion (Milpo)														
Pukaqaqa (Milpo)													40	329
Pampa de Pongo (JMP)					2	34	142	582	142	1,120	142	1,120	142	1,120
Los Calatos (Hampton)											4	32	4	32
Michiquillay (SPCC)											5	42	5	42
Shahuindo (Tahoe)	5	9	7	57	8	63	8	66	8	71	8	71	8	71
Hagura (Antares)													90	622

PROGRAMA DE OBRAS DE GENERACIÓN 2018 - 2024

FECHA	PROYECTO	TECNOLOGÍA	EMPRESA	MW	NOTAS
Nov-2018	CH Carhuac	Hidroeléctrica-RER	ANDEAN POWER S.A.C.	20.00	(1)
Ene-2019	CB Callao	Biomasa	PETRAMAS S.A.C.	2.40	(1)
Mar-2019	CH Centauro - Etapa I	Hidroeléctrica	CORPORACION MINERA DEL PERU S.A. - CORMIPESA	12.50	(2)
Jul-2019	CH Karpa	Hidroeléctrica-RER	HIDROELECTRICA KARPA S.A.C.	20.00	(3)
Set-2019	CH La Virgen	Hidroeléctrica	LA VIRGEN S.A.C.	84.00	(4)
Oct-2019	CH Manta	Hidroeléctrica-RER	PERUANA DE INVERSIONES EN ENERGIAS RENOVABLES S.A.	19.78	(4)
Nov-2019	CH Zaña 1	Hidroeléctrica-RER	ELECTRO ZAÑA S.A.C.	13.20	(4)
Ene-2020	CH 8 de Agosto	Hidroeléctrica-RER	GENERACION ANDINA S.A.C.	19.83	(1)
Ene-2020	CH El Carmen	Hidroeléctrica-RER	GENERACION ANDINA S.A.C.	8.60	(1)
Ene-2020	CE Huambos	Eólica	GR PAINO S.A.C.	18.40	(1)
Ene-2020	CE Duna	Eólica	GR TARUCA S.A.C.	18.40	(1)
Mar-2020	CH Santa Lorenza I	Hidroeléctrica-RER	EMPRESA DE GENERACION ELECTRICA SANTA LORENZA S.A.C.	18.70	(1)
Mar-2020	CH Laguna Azul	Hidroeléctrica-RER	CH MAMACOCOA S.R.L.	20.00	(4)
May-2020	CH Hydrika 6	Hidroeléctrica-RER	HYDRIKA 6 S.A.C.	8.90	(4)
Ago-2020	CH Ayanunga	Hidroeléctrica-RER	ENERGETICA MONZON S.A.C.	20.00	(1)
Ago-2020	CT Refinería Talara	Térmica	PETROLEOS DEL PERU PETROPERU S.A. - PETROPERU	100.00	(1)
Ago-2020	CH Shima	Hidroeléctrica-RER	ENERGIA HIDRO S.A.C.	9.00	(1)
Ene-2021	CH Centauro - Etapa II	Hidroeléctrica	CORPORACION MINERA DEL PERU S.A. - CORMIPESA	12.50	(5)
Ene-2021	CH Colca	Hidroeléctrica-RER	EMPRESA DE GENERACION ELECTRICA COLCA S.A.C. - EGECOLCA	12.05	(4)
Ene-2021	CH Kusa	Hidroeléctrica-RER	CONCESIONARIA HIDROELECTRICA SUR MEDIO S.A. - CONHIDRO	15.55	(4)

FECHA	PROYECTO	EMPRESA	NOTAS
Nov-2020	Ampliación de transformación de la SE Tocache TP 138/23/10 kV - 20 MVA	REP	(2)
Nov-2020	SET Tingo Maria: Cambio de Transformador 138/10 kV - 10 MVA por otro de 138/23/10 kV - 30 MVA	REP	(2)
Dic-2020	Nueva SE Alto Zapata (Moquegua Ciudad): TP 138/23/10kV de 25MVA	ELECTROSUR	(2)
Dic-2020	LT 138 kV Moquegua - Alto Zapata (Moquegua Ciudad) de 115 MVA y 6 km	ELECTROSUR	(2)
Ene-2021	Repotenciación de la LT 220 kV Trujillo - Cajamarca a 250 MVA	-	(2)
Ene-2021	LT 138 kV Trujillo Norte - Trujillo Noroeste de 185 MVA y 6 km	HIDRANDINA	(2)
Ene-2021	LT 138 kV Der Chimbote Nueva - Chimbote Nueva de 74 MVA y 0,8 km	HIDRANDINA	(2)
Ene-2021	Nueva SE Chimbote Nueva 138/23/13,8 kV de 40/20/30 MVA	HIDRANDINA	(2)
Jul-2021	LT 220 kV Tintaya-Azángaro de 450 MVA	REDESUR	(1)
Set-2021	LT 138 kV Base Islay - Matarani de 130 MVA y 10,99 km	SEAL	(2)
Set-2021	Nueva SE Matarani: TP 138/10 kV de 40 MVA	SEAL	(2)
Set-2021	LT 138 kV Charcani VII - Cono Norte 2 de 130 MVA y 11,59 km	SEAL	(2)
Set-2021	Nueva SE Cono Norte 2: TP 138/10 kV de 75MVA	SEAL	(2)
Oct-2021	Repotenciación a 1000 MVA de la L.T. Carabayllo-Chimbote-Trujillo 500 kV	-	(4)
Oct-2021	Compensador Reactivo Variable (SVC o similar) +400/-150 MVAR en SE Trujillo 500 kV	-	(4)
Dic-2021	Eólica 500 kW Macho, Nueva Yareña, Camarones y subestaciones asociadas	CTM	(4)



GRACIAS

saniel.salazar.c@uni.pe